

**ANALISIS KEANDALAN SISTEM
INSTRUMENTASI PLTG DI PT. PLN PLTD/G
TELUK LEMBU PEKANBARU**

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada
Jurusan Teknik Elektro

Oleh

RINO ELDIKA
10755000171



**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU**

2011

ANALISIS KEANDALAN SISTEM INSTRUMENTASI PLTG DI PT. PLN PLTD/G TELUK LEMBU PEKANBARU

RINO ELDIKA
NIM : 10755000171

Tanggal Sidang : 03 November 2011
Periode Wisuda : Februari 2012

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

PT. PLN PLTD/G Teluk Lembu adalah salah satu perusahaan yang bergerak dibidang pembangkit listrik, yang dalam operasinya menggunakan peralatan yang telah terintegrasi antara satu dengan yang lain dan memiliki sistem instrumentasi untuk setiap pengontrolannya. Kemampuan yang besar dari instrumentasi ini juga diikuti dengan resiko hilangnya daya pada saat terjadi kegagalan distribusi listrik. Hal ini tentunya tidak dikehendaki oleh PT. PLN, karena terjadinya *failure* mengakibatkan hilangnya pendapatan dan kesempatan. Oleh sebab itu PT. PLN menerapkan sistem instrumentasi pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang dapat memberikan pengontrolan sehingga dapat meningkatkan keandalan.

Keandalan merupakan salah satu parameter performansi yang penting karena hasil prediksi keandalan dapat digunakan untuk menentukan pilihan terhadap pemakaian suatu instrumentasi dan implementasinya pada suatu pembangkit. Parameter keandalan suatu pembangkit mencakup ketersediaan (*availability*), *down time system* dan *Mean Time to Failure* (MTTF) atau prediksi usia pakai suatu jaringan. Dengan menganalisis parameter-parameter di atas didapatkan tingkat ketersediaan sistem instrumentasi PLTG di PT. PLN PLTD/G Teluk Lembu lebih besar dari 99,99%. Tingkat ketersediaan (*availability*) yang didapat memiliki rata-rata 99,99873259 %, dengan nilai *down time system* sebesar 6,66150696 menit/tahun, dan *Mean Time to Failure* (MTTF) adalah 69,98554999 tahun.

Dengan hasil perhitungan di atas dapat disimpulkan bahwa sistem instrumentasi PLTG di PT. PLN memenuhi persyaratan yang telah distandarkan untuk proses industri.

Kata Kunci : *Availability*, *Down Time System*, Instrumentasi PLTG, keandalan dan MTTF

AN ANALYSIS OF INSTRUMENT SYSTEM RELIABILITY OF PLTG IN PT. PLN PLTD/G TELUK LEMBU PEKANBARU

RINO ELDIKA
NIM : 10755000171

Date of Final Exaam: November 03th , 2011
Graduation Ceremony Period : February , 2012

Electrical Engineering Departement
Faculty of sains and techonology
State Islamic University Sultan Syarif Kasim Riau
Soebrantas Street No. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

PT. PLN PLTD / G Teluk Lembu is one company engaged in power generation, which in its operations using equipment that has been integrated with each other and have a system of instrumentation for each controller. Great ability of this instrumentation was also followed by the risk of loss of power in the event of failure of electricity distribution. This is certainly not desired by PT. PLN, because of the failure resulted in loss of income and opportunity. Therefore PT. PLN implement instrumentation system on Power Plant Gas (PLTG) that can provide controlled so as to boost the reliability.

Reliability is one important performance parameter for the reliability prediction results can be used to determine the choice to use an instrumentation and its implementation at a power plant . Reliability parameters of a generator includes the availability (availability), system downtime and Mean Time To Failure (MTTF) or the lifetime prediction of a network. By analyzing the above parameters obtained power plant instrumentation system availability levels in the PT. PLN PLTD / G Teluk Lembu is greater than 99.99%. Level of availability (availability) has gained an average of 99.99873259%, with a value of 6.66150696 system downtime minutes per year, and Mean Time To Failure (MTTF) is 69.98554999 years.

With the calculation results in It can be concluded that the power plant instrumentation system on PT. PLN to meet the requirements that have been standardized for industrial processes.

*Key Words: Availability, Down Time System, Instrumentation PLTG, reliability
and MTTF*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN COVER.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL.....	iv
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-2
1.3 Batasan Masalah	I-2
1.4 Tujuan.....	I-3
1.5 Manfaat Penelitian.....	I-3
1.5.1 Manfaat Ilmiah.....	I-3
1.5.2 Manfaat Terapan	I-3
1.6 Metode Penelitian.....	I-3
1.7 Sistematika Penulisan.....	I-4
 BAB II TEORI KEANDALAN DAN METODE MARKOV	
2.1 Terminologi Keandalan.....	II-1
2.2 Teori Probabilitas	II-2

2.2.1	Sistem Seri	II-2
2.2.2	Sistem Paralel	II-3
2.2.3	Sistem Redundansi <i>Standby</i>	II-4
2.3	Metode Markov	II-5
2.3.1	Model Markov untuk Analisa Keandalan Sistem	II-7
2.3.2	<i>Absorbing State</i>	II-9
2.3.3	Sistem dengan Dua Komponen Berbeda yang Dapat Diperbaiki	II-11
2.3.4	Sistem dengan Dua Komponen Berbeda yang Dapat Diperbaiki	II-14
2.3.5	Metode Pendekatan Markov untuk Sistem Konfigurasi Seri dan Paralel	II-17
2.3.6	Langkah-Langkah Analisis Keandalan Sistem dengan Pendekatan Markov.....	II-19

BAB III INSTRUMENTASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS (PLTG)

3.1	Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).....	III-1
3.1.1	Kompresor.....	III-2
	3.1.1.1 Kompresor Perpindahan Positif (<i>Positive Replacement Compressor</i>).....	III-3
	3.1.1.2 Kompresor Dinamik	III-5
3.1.2	Ruang Bakar (<i>Combustion Chamber</i>)	III-6
3.1.3	Turbin Gas	III-7
	3.1.3.1 Proses Kerja Turbin Gas	III-7
	3.1.3.2 Komponen Pokok Sistem Turbin Gas.....	III-10
3.1.4	Generator	III-12
	3.1.4.1 Pengaman Generator	III-14
3.2	Diagram Alir PLTG.....	III-15
3.3	Kelebihan dan Kekurangan PLTG	III-17
3.4	Prinsip Operasi PLTG	III-18
3.5	Instrumentasi di PLTG	III-19

3.5.1	Termokopel.....	III-20
3.5.2	<i>Flame Detector</i>	III-23
3.5.3	<i>Pressure Gauge</i>	III-24
3.6	Sistem Instrumentasi di PLTG	III-24
3.7	Pendekatan Markov pada Penerapan Sistem Instrumentasi PLTG di PT. PLN Teluk Lembu	III-26

BAB IV ANALISIS KEANDALAN SISTEM INSTRUMENTASI

PLTG DI PT. PLN PLTD/G TELUK LEMBU PEKANBARU

4.1	Data Perangkat.....	IV-1
4.2	Analisis Keandalan Sistem Instrumentasi Pembangkit pada PLTG Teluk Lembu	IV-2

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan.....	V-1
5.2	Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

LAMPIRAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan dunia industri yang semakin pesat, fabrikasi pengolahan dan perkembangan teknologi lainnya meningkatkan kebutuhan akan tenaga listrik karena energi listrik dapat dengan mudah dibangkitkan, ditransmisikan, lalu didistribusikan melalui konversi energi dari bentuk energi yang satu menjadi bentuk energi yang lainnya.

Proses-proses di industri sering kali melibatkan sistem instrumentasi, salah satunya sistem instrumentasi pada pembangkit listrik, dimana sistem instrumentasi bertujuan untuk mempertahankan kondisi kerja dari pembangkit itu sendiri dengan mengatur parameter yang ada di dalamnya yaitu temperatur, tekanan, getaran (*vibration*) maupun alarm. Hal ini sebenarnya dilakukan untuk mempertahankan kesinambungan terhadap proses kerja dari pembangkit listrik itu sendiri. Selain itu, hasil keluaran instrumentasi berupa data pengontrolan dari unit pembangkit seperti kompresor, *combuster*, turbin maupun generator. Kemampuan instrumentasi yang berada di unit pembangkit tidak bisa bertahan lama dan sering mengalami kegagalan pada proses kerja dikarenakan usia pakai maupun gagal fungsi dari setiap instrumentasi. Oleh karena itu, untuk mengatasi kegagalan pengoperasian pembangkit diperlukan suatu sistem instrumentasi yang andal.

Pembangkitan tenaga listrik yang terdapat di Pekanbaru menjadi tempat penulis untuk melihat secara langsung proses pembangkitan energi listrik. Sebagai perusahaan nasional yang menunjang pendidikan, maka sangatlah tepat jika memilih PT. PLN (Persero) PLTD/G Teluk Lembu Pekanbaru untuk melakukan penelitian.

Pada sistem pembangkit, tingkat keandalan ditentukan oleh kemampuan sistem. Keandalan pembangkit merupakan probabilitas suatu alat atau pendayagunaan sistem supaya mampu melakukan suatu pengoperasian pada periode waktu tertentu sesuai dengan apa yang diharapkan.

Penelitian sebelumnya, Waradiba, Safarina (2007), menjelaskan tentang *Boiler Feed Pump Turbin* (BFPT) merupakan salah satu komponen penting di dalam suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) karena merupakan komponen penyedia *feed water* dan power yang dibutuhkan *Boiler Feed Water* (BFW). Dimana analisis *reliability* instrument pada (BFPT) menggunakan *Metode Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA), yang menganalisis *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi dengan mengidentifikasi mode-mode dan akibat kegagalannya.

Hasil dari penelitian sebelumnya menggunakan analisis FMEA, berdasarkan hal tersebut, penulis tertarik untuk mengembangkan penelitian tentang keandalan instrumentasi yang menganalisis keandalan sistem instrumentasi di PT. PLN PLTD/G Teluk Lembu yang dikhususkan pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dengan menggunakan metode Markov. Adapun parameter keandalan yang akan dibahas adalah menganalisis *Availability* (ketersediaan), *Down Time System*, dan *Mean Time to Failure* (MTTF) atau prediksi usia pakai instrumentasi di PT. PLN PLTD/G Teluk Lembu.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah yang telah diuraikan, maka permasalahan dapat dirumuskan, bagaimana mengetahui keandalan sistem instrumentasi pada PLTG Teluk Lembu Pekanbaru.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini pembahasan dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Parameter keandalan yang dibahas adalah *Availability* (ketersedian), *down time system*, dan *MTTF system*
2. Analisis keandalan sistem ini hanya pada sistem instrumentasi di PLTD/G Teluk Lembu
3. Metode yang digunakan dalam menganalisis data adalah menggunakan metode Markov

4. Pada penelitian ini tidak dibahas jenis gangguan yang menyebabkan kerusakan

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah dapat menganalisis keandalan sistem instrumentasi PLTG di PT. PLN PLTD/G Teluk Lembu.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menentukan keandalan sistem instrumentasi PLTG terhadap gangguan pada instrumentasi.

1.5.1 Manfaat Ilmiah

Agar dapat menambah literatur perkembangan ilmu pengetahuan di bidang instrumentasi.

1.5.2 Manfaat Terapan

Diharapkan dapat berguna untuk membantu meningkatkan performansi sistem pembangkit dunia industri pada proses pengontrolannya.

1.6 Metode Penelitian

Metode yang dipakai yaitu :

1. Studi Literatur

Referensi yang dipakai dikumpulkan dari buku-buku dan paper dari internet yang berkaitan dengan judul.

2. Observasi Lapangan

Peninjauan secara langsung ke lapangan

3. Analisa Data

Menganalisis perhitungan yang terkait dengan data yang telah diperoleh.

1.7 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan secara umum dan singkat mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat penelitian, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI KEANDALAN DAN METODE MARKOV

Bab ini berisi tentang konsep dasar dari kendalan dan penggunaan teori Markov untuk menganalisis keandalan suatu sistem.

BAB III INSTRUMENTASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS (PLTG)

Bab ini berisi tentang konfigurasi sistem instrumentasi PLTG, serta pendekatan markov untuk masing-masing kombinasi perangkat PLTG.

BAB IV ANALISIS KEANDALAN SISTEM INSTRUMENTASI PLTG DI PT. PLN PLTD/G TELUK LEMBU PEKANBARU

Bab ini berisi tentang analisis keandalan sistem instrumentasi yang diimplementasikan pada PLTG dengan menggunakan metode Markov

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari penelitian pada bab-bab sebelumnya.

BAB II

TEORI KEANDALAN DAN METODE MARKOV

Keandalan Sistem adalah probabilitas atau peluang sistem dapat berfungsi seperti yang diharapkan untuk rentang waktu tertentu di bawah kondisi yang ditetapkan (Gunawan, Arief Hamdani dan Franky Ferdinand, 2002).

2.1 Terminologi Keandalan

Beberapa istilah yang berhubungan dengan keandalan sistem:

- a. **Komponen** merupakan bagian dari suatu sistem.
- b. **Failure** (kegagalan atau kerusakan) adalah suatu kerusakan perangkat atau sistem sehingga tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya.
- c. **Failure Rate** atau laju kerusakan menunjukkan jumlah kegagalan atau kerusakan selama waktu pakai perangkat .
- d. **MTBF** (*Mean Time Between Failure*) adalah rata-rata waktu diantara dua kejadian kegagalan untuk suatu komponen atau sistem, mempunyai satuan jam atau tahun
- e. **MTTF** (*Mean Time to Failure*) adalah nilai rata-rata untuk waktu kegagalan sistem. Secara umum MTBF dan MTTF dinyatakan dalam jam atau tahun per kegagalan, dengan 1 tahun = 8760 jam.
- f. **MTTR** (*Mean Time to Repair*) adalah rata-rata waktu untuk perbaikan suatu elemen dalam suatu sistem untuk kembali beroperasi.
- g. **Keandalan** adalah peluang bahwa perangkat dapat berfungsi sebagai yang diharapkan setelah waktu t yang ditentukan.
- h. **Failure In Time (FIT)** adalah jumlah kegagalan per 10^9 jam operasi dari sebuah komponen. Merupakan salah satu satuan untuk laju kerusakan.

$$FIT (10^9 \text{ jam}) = \frac{(1 \times 10^9)}{MTBF (\text{jam})}$$

- i. **Ketersediaan (*Availability*)** adalah kemampuan suatu sistem dapat beroperasi sebagaimana mestinya pada suatu saat atau waktu yang ditentukan

- j. **Unavailability** (ketidakterersediaan) adalah probabilitas sistem yang tidak dapat beroperasi. Mempunyai satuan menit/tahun atau berbentuk pecahan dalam persen.

$$U = 1 - A$$

- k. **Down Time Sistem** adalah waktu rata-rata suatu sistem tidak melakukan fungsi seperti yang diinginkan.

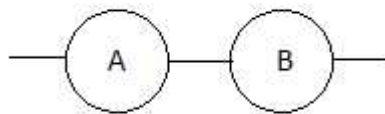
2.2 Teori Probabilitas

Probabilitas merupakan suatu indeks numerik yang nilainya antara 0 dan 1. Indeks numerik 0 akan mengidentifikasi suatu kejadian yang tidak kan terjadi, sedang indeks numerik 1 akan mengidentisfikasi suatu kejadian yang pasti terjadi. Untuk keperluan teori keandalan, nilai probabilitas secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi dua keluaran yaitu keluaran yang mewakili kejadian yang didefinisikan sebagai kejadian sukses, sedang keluaran yang lainnya mewakili kejadian yang didefinisikan sebagai kejadian yang gagal (Ebeling, 1997).

Pada prakteknya, sistem sering dimodelkan dengan menggunakan jaringan (*network*) di mana komponen-komponen pada sebuah sistem dihubungkan dalam pola hubungan seri, paralel, dan sistem redundansi *standby*.

2.2.1 Sistem Seri

Sistem yang terdiri dari dua komponen seri yakni komponen A san komponen B memiliki indeks keandalan komponen (R) masing-masing R_a dan R_b . Dengan demikian keandalan sistem dapat ditentukan dengan :



Gambar 2.1 Sistem Seri dengan Dua Komponen

$$R_s = R_a \times R_b \quad (2-1)$$

Jika terdapat n komponen yang terhubung secara seri maka :

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2-2)$$

Dengan demikian indeks keandalan sistem yang terdiri dari beberapa komponen seri adalah perkalian dari indeks keandalan masing-masing komponen di dalam sistem tersebut. Komponen-komponen dapat dikatakan terhubung secara seri jika untuk menjamin sistem sukses semua komponen harus beroperasi atau tidak boleh gagal. Kegagalan pada suatu komponen yang terhubung seri akan menyebabkan kegagalan sistem. Ketidakandalan adalah komplemen dari keandalan, maka :

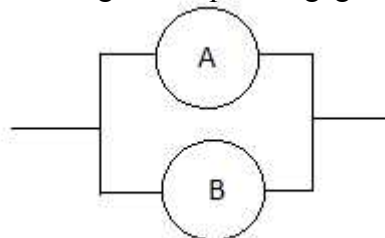
$$Q_s = 1 - (R_a \times R_b) \quad (2-3)$$

Dan untuk komponen n seri maka :

$$Q_s = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (2-4)$$

2.2.2 Sistem Paralel

Perhatikan dua komponen A dan B yang terhubung secara paralel seperti gambar 2.2 Pada susunan tersebut, sistem sukses ditentukan jika paling tidak salah satu dari komponen tersebut sukses. Dengan kata lain, sistem akan gagal jika semua komponen yang terhubung secara paralel gagal.



Gambar 2.2 Sistem Paralel dengan Dua Komponen

Indeks ketidakandalan sistem dirumuskan dengan :

$$Q_p = 1 - (Q_a \times Q_b) \quad (2-5)$$

Jika terdapat n komponen yang terhubung secara paralel maka indeks ketidakandalan sistem adalah :

$$Q_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2-6)$$

Dengan demikian indeks keandalan sistem di peroleh dengan :

$$R_{ps} = 1 - \frac{area}{Q_t} = 1 - \left(\frac{area}{Q_a \times Q_b} \right) \quad (2-7)$$

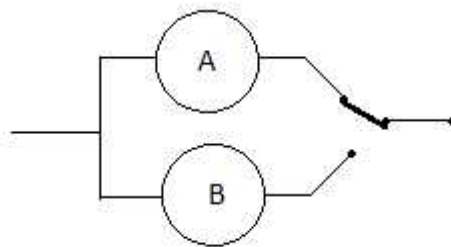
Jika terdapat n komponen yang terhubung secara paralel maka, indeks keandalan sistem adalah :

$$R_{ps} = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (2-8)$$

Dari pernyataan di atas dapat diketahui bahwa semakin banyak komponen yang terhubung secara paralel di dalam sistem, maka indeks keandalan sistem akan semakin tinggi.

2.2.3 Sistem Redundansi *Standby*

Sistem *standby* mengoperasikan satu atau lebih komponen utama dan satu atau lebih komponen dalam posisi *standby* yang akan beroperasi bila komponen utama gagal. Proses pemindahan kerja komponen ini dilakukan dengan menggunakan *switch*. Gambar 2.3. Adalah susunan redundansi *standby* di mana komponen A beroperasi terlebih dahulu (karena terhubung dengan *switch*) sampai komponen tersebut gagal dan selanjutnya jika gagal *switch* akan berpindah ke komponen B untuk menggantikan fungsi komponen A.



Gambar 2.3. Redundansi *Standby*

Pada Sistem Redundansi *Standby* terdapat 2 jenis *switching*, yaitu :

1. *Perfect Switching* (*switch* yang sempurna)

Pada kasus ini, *switch* diasumsikan tidak pernah gagal pada saat pengoperasian dan juga tidak akan mengalami kegagalan pada saat melakukan pengalihan dari pengoperasian normal ke posisi *standby*. Atau dengan kata lain untuk kasus *switch* sempurna (tidak mungkin gagal) *switch* pasti sukses dalam memindahkan fungsi kerja komponen A ke komponen B saat komponen A

tersebut gagal, maka sistem akan gagal jika komponen A gagal dan komponen B gagal (dimana A sudah gagal terlebih dahulu) atau dapat dituliskan :

$$Q = Q_A \cdot Q_B \quad (2-9)$$

Jika komponen A dan komponen B diasumsikan independen satu sama lain, maka

$$Q = Q_A \cdot Q_B \quad (2-10)$$

2. Imperfect Switching (switch tidak sempurna)

Jika *switch* tidak sempurna, maka berarti switch tersebut memiliki peluang untuk gagal dalam memindahkan fungsi kerja komponen A saat gagal menuju komponen B. Jika peluang *switch* sukses melakukan kerjanya adalah P_s , maka peluang kegagalan *switch* akan menjadi $Q_s = (1 - P_s)$. Permasalahan ini selanjutnya dapat diselesaikan dengan konsep peluang bersyarat (*conditional probability*) dimana :

$$P(\text{sistem gagal}) = P(\text{sistem gagal jika switch sukses}) \times P(\text{switch sukses}) + P(\text{sistem gagal karena switch gagal}) \times P(\text{switch gagal})$$

Pernyataan di atas dapat diterjemahkan secara matematis menjadi :

$$\begin{aligned} Q &= Q_A \cdot Q_B \cdot P_s + Q_A \cdot Q_s \\ &= Q_A \cdot Q_B \cdot P_s + Q_A (1 - P_s) \\ &= Q_A \cdot Q_B \cdot P_s + Q_A - Q_A \cdot P_s \\ &= Q_A - Q_A \cdot P_s (1 - Q_B) \end{aligned} \quad (2-11)$$

Jika switch terhubung dengan komponen B (komponen A *standby*), maka :

$$Q = Q_B - Q_B \cdot P_s (1 - Q_A) \quad (2-12)$$

2.3 Metode Markov

Konsep dasar *Markov Chain* baru diperkenalkan sekitar tahun 1907, oleh seorang Matematisi Rusia *Andrei A. Markov* (1856-1992). Model ini berhubungan dengan suatu rangkaian proses dimana kejadian akibat suatu eksperimen hanya tergantung pada kejadian yang langsung mendahuluinya dan tidak tergantung pada rangkaian kejadian sebelum-sebelumnya yang lain. *Markov Chain* bisa diterapkan di berbagai bidang antara lain ekonomi, politik, kependudukan, industri, pertanian, elektro dan lain-lain. Sebelumnya terlebih dahulu dibahas konsep dasar dari *Markov Chain* (MC) itu sendiri.

Beberapa teknis analitik untuk melakukan evaluasi keandalan sistem. Meskipun teknik-teknik tersebut dapat diaplikasikan baik untuk komponen-komponen *repairable* dan *non-repairable*, namun teknik-teknik tersebut mengasumsikan bahwa proses perbaikan (*repair*) membutuhkan waktu yang sangat singkat yang relatif jauh lebih kecil dibandingkan dengan waktu operasi komponen tersebut. Dengan kata lain, teknik-teknik tersebut tidak mengakomodasikan waktu perbaikan untuk dijadikan pertimbangan dalam evaluasi keandalan sistem. Hal ini tentunya tidak berlaku untuk semua sistem, malahan sistem-sistem *nonelectronic* umumnya memiliki karakter yang berlawanan dengan asumsi di atas. Karena itu dibutuhkan suatu teknik analitik yang mampu memasukkan komponen waktu perbaikan ke dalam proses evaluasi keandalan sistem. Salah satu teknik yang mampu mengakomodasi waktu perbaikan ke dalam evaluasi keandalan sistem adalah *Markov Modelling* (Ramakumar, 1993).

Teknik pemodelan dengan menggunakan pendekatan markov (*Markov Approach*) menawarkan suatu pemodelan untuk memperhitungkan waktu reparasi atau *repairable sistem*. Pendekatan markov dapat diaplikasikan pada perilaku (*behavior*) random dari suatu sistem yang bervariasi secara diskrit maupun kontinyu terhadap ruang dan waktu. Variasi random baik secara diskrit maupun secara random ini disebut dengan proses stokastik (*stochastic process*).

Ada beberapa syarat agar metode markov dapat diaplikasikan dalam evaluasi keandalan sistem. Syarat-syarat tersebut adalah:

- 1) Sistem harus berkarakter *Lack of Memory*

Dimana kondisi sistem di masa mendatang tidak dipengaruhi (*independent*) oleh kondisi sebelumnya. Artinya kondisi sistem saat evaluasi tidak dipengaruhi oleh kondisi sebelumnya, kecuali kondisi sesaat sebelum kondisi saat ini.

- 2) Sistem harus *stationary* atau homogen

Artinya perilaku sistem selalu sama di sepanjang waktu atau peluang transisi sistem dari suatu kondisi ke kondisi lainnya akan selalu sama disepanjang waktu. Dengan demikian maka pendekatan markov hanya dapat di aplikasikan untuk sistem dengan laju kegagalan yang konstan.

3) *State is identifiable*

Kondisi yang memungkinkan terjadi pada sistem harus diidentifikasi dengan jelas. Apakah sistem memiliki dua kondisi (*state*) yakni kondisi beroperasi dan gagal, ataukah sistem memiliki 3 kondisi, yakni 100% sukses, 50% sukses dan 100% gagal.

2.3.1 Model Markov untuk Analisa Keandalan Sistem

Tujuan analisa markov adalah untuk menghitung $P_i(t)$ yaitu probabilitas sistem pada *state* i dalam waktu t . Analisa keandalan dengan model markov dimulai dengan menetapkan semua kondisi yang dapat terjadi pada sistem hingga mencapai kerusakan sistem secara total. Kemudian hubungan semua keandalan yang mungkin terjadi pada komponen penyusun sistem selama masa pakai digambarkan dengan rantai Markov, yang disebut dengan “diagram transisi state”. (Ramakumar, 1993).

Sebuah *state* pada rantai Markov merupakan kombinasi dari komponen yang bekerja dan komponen yang gagal. Penyelesaian model Markov hingga memperoleh seluruh fungsi dan nilai yang diinginkan diselesaikan dengan persamaan dalam bentuk matriks Markov.

Dalam proses Markov kontinu, diasumsikan sistem dipengaruhi oleh n *state* diskrit, yaitu S_1, S_2, \dots, S_n . Transisi yang terjadi dari satu *state* ke *state* yang lain ditentukan dengan ρ_{ij} .

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & \Lambda & S_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ M \\ S_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \Lambda & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \Lambda & \rho_{2n} \\ M & M & & M \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \Lambda & \rho_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2-13)$$

ρ_{ij} = laju perpindahan dari *state* S_i ke *state* S_j

dan

$\rho_{ij}\Delta t = P_{ij}$ = probabilitas transisi dari S_i ke S_j dalam interval waktu Δt

Jika $P_i(t)$ probabilitas sistem S_i dalam waktu t , maka probabilitas sistem S_i dalam waktu $(t + \Delta t)$ adalah :

$$P_i(t+\Delta t) = \sum_{j=1}^n \rho_{ji} \Delta t P_j(t) + \left[1 - \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \Delta t \right] P_i(t) \quad (2-14)$$

$$\frac{P_i(t+\Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = \sum_{j=1}^n \rho_{ji} P_j(t) - \left[P_i(t) \right] \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \quad (2-15)$$

Untuk $\Delta t \rightarrow 0$, maka :

$$P'_i(t) = \sum_{j=1}^n \rho_{ji} P_j(t) - \left[P_i(t) \right] \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \quad (2-16)$$

Untuk $i = 1, 2, \dots, n$, didapat persamaan differensial dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} P'_1(t) \\ P'_2(t) \\ \vdots \\ P'_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{j=2}^n \rho_{1j} & \rho_{21} & K & \rho_{n1} \\ \rho_{12} & -\sum_{j=1}^n \rho_{2j} & K & \rho_{n2} \\ M & M & M & M \\ \rho_{1n} & \rho_{2n} & \Lambda & -\sum_{j=1}^{n-1} \rho_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \vdots \\ P_n(t) \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Berdasarkan persamaan differensial (persamaan 3), maka :

$$\text{Der}(P_i) = \frac{d}{dt} P_i(t) = 0 \quad (2-18)$$

Untuk menghitung probabilitas terbatas (*steady state*) persamaan differensial Markov menjadi :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{j=2}^n \rho_{1j} & \rho_{21} & \Lambda & \rho_{n1} \\ \rho_{12} & -\sum_{j=1, j \neq 1}^n \rho_{2j} & \Lambda & \rho_{n2} \\ M & M & M & M \\ \rho_{1n} & \rho_{12} & \Lambda & -\sum_{j=1}^{n-1} \rho_{2j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ M \\ P_n \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

Karena $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ maka persamaan differensial matriks yang digunakan untuk mendapatkan probabilitas *state* ke-n menjadi :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum_{j=2}^n \rho_{1j} & \rho_{21} & \Lambda & \rho_{n1} \\ \rho_{12} & -\sum_{j=1, j \neq 1}^n \rho_{2j} & \Lambda & \rho_{n2} \\ M & M & M & M \\ 1 & 1 & \Lambda & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ M \\ P_n \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

Berdasarkan matriks ini maka probabilitas *state* ke n dapat diperoleh. Ketersediaan dan ketidaktersediaan sistem dapat dihitung dengan persamaan berikut:

3. Sistem dengan konfigurasi seri:

$$\text{Ketersediaan} : A = P_1 \quad (2-21)$$

$$\text{Ketidaktersediaan} : U = \sum_{i=2}^n P_i \quad (2-22)$$

4. Sistem dengan konfigurasi paralel :

$$\text{Ketersediaan} : A = P_1 + P_2 + \dots + P_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} P_i \quad (2-23)$$

$$\text{Ketidaktersediaan} : U = P_n \quad (2-24)$$

2.3.2 Absorbing State

Jika sebuah sistem memasuki *Absorbing State* maka sistem itu tidak akan bisa keluar dari *state* tersebut kecuali sistem memulai misi baru (Ebiling, 1997). Satu persyaratan dari analisa keandalan mengevaluasi jumlah rata-rata dari

interval waktu di mana sistem berada pada salah satu *non-repairable state*. Atau dengan kata lain berapa kali interval sistem beroperasi sebelum sistem tersebut memasuki *absorbing state*.

Prinsip ini juga dapat diterapkan pada *repairable system*, yaitu untuk mengevaluasi jumlah rata-rata interval waktu sistem yang akan beroperasi secara memuaskan sebelum memasuki keadaan yang tidak diinginkan. Berikut ini akan diuraikan metode perhitungan yang dipakai untuk menghitung berapa interval waktu rata-rata dari suatu sistem sebelum *absorbing state* tercapai. Jika **P** merupakan matriks probabilitas transisi stokastik dari sistem, sebuah *truncated matriks Q* dapat dibuat dengan menghapus kolom dan baris matriks yang berkaitan dengan *absorbing state*.

Berikut adalah contoh matriks P yang mengandung matriks 3 x 3 :

$$P = \begin{bmatrix} \left[1 - \sum_{j=2}^3 \rho_{1j}\right] & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \left[1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^3 \rho_{2j}\right] & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \left[1 - \sum_{j=1}^2 \rho_{3j}\right] \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

Dengan menggunakan matriks **P** di atas, misal diasumsikan bahwa **S3** adalah kondisi pada *absorbing* (penyerapan), maka :

$$\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & S_3 & S_1 & S_2 \\ \begin{array}{c} S_3 \\ S_1 \\ S_2 \end{array} & \begin{bmatrix} 1 - \sum_{j=1}^{3-1} \rho_{3j} & \rho_{13} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & 1 - \sum_{j=2}^n \rho_{1j} & \rho_{12} \\ \rho_{32} & \rho_{21} & 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n \rho_{2j} \end{bmatrix} \end{array} \end{array} \quad (2-26)$$

Berdasarkan matriks di atas didapat matriks Q sebagai berikut :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{j=2}^n \rho_{1j} & \rho_{12} \\ \rho_{21} & 1 - \sum_{j=2}^n \rho_{2j} \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

Maka:

$$[1 - Q]^{-1} = N \text{ (Matriks Fundamental)} \quad (2-28)$$

Berdasarkan matriks fundamental N maka **MTTF** dapat dihitung.

2.3.3 Sistem dengan Dua Komponen Berbeda yang Dapat Diperbaiki

Di dalam pemodelan untuk 2 buah komponen yang berbeda yang dapat diperbaiki, kita asumsikan bahwa setiap komponen dapat berada dalam kondisi *up* (baik atau beroperasi) atau *down* (rusak atau tidak beroperasi). Dimana λ_1, λ_2 adalah laju kegagalan dan μ_1, μ_2 adalah laju perbaikan secara berturut-turut dari 2 komponen tersebut (Ramakumar, 1993).

$$\lambda = \frac{\text{Jumlah kegagalan komponen dalam rentang waktu tertentu}}{\text{Total waktu operasi komponen}} \quad (2-29)$$

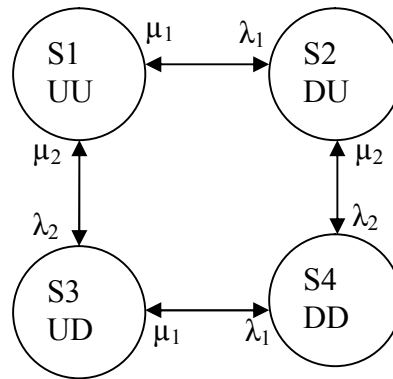
$$\mu = \frac{\text{Jumlah perbaikan komponen dalam rentang waktu tertentu}}{\text{Total waktu perbaikan komponen}} \quad (2-30)$$

Untuk sistem dengan dua komponen yang berbeda, maka 2^2 atau 4 kemungkinan keadaan di dalam sistem tersebut, seperti yang terlihat pada tabel berikut :

Tabel 2.1 Tabel Keadaan untuk Sistem dengan Dua Komponen Berbeda

STATE (KEADAAN)	UNIT 1	UNIT 2
<i>State 1</i>	<i>Up</i>	<i>Up</i>
<i>State 2</i>	<i>Down</i>	<i>Up</i>
<i>State 3</i>	<i>Up</i>	<i>Down</i>
<i>State 4</i>	<i>Down</i>	<i>Down</i>

Dari tabel keadaan di atas dapat dibuat hubungan antar keadaan dengan menggunakan diagram seperti yang terlihat pada gambar 2.4. Satu hal yang perlu diingat bahwa perpindahan di antara S1 dan S4 atau diantara S2 dan S3 tidak boleh dilakukan, karena perpindahan tersebut memperoleh 2 pergantian secara bersamaan dari komponen yang terlibat. Probabilitas dari kejadian yang bersamaan tersebut dapat diasumsikan sebagai kemungkinan kecil yang akan terjadi, sehingga dapat diabaikan.



Gambar 2.4 Diagram Keadaan Dua Komponen Berbeda yang dapat diperbaiki

Diagram keadaan yang ditunjukkan pada gambar 2.4 merupakan diagram keadaan umum yang mewakili sebuah sistem yang memiliki dua buah komponen tanpa memandang apakah konfigurasi seri, paralel, atau *standby*.

Dari diagram keadaan gambar 2.4 di atas, dapat dibuat matriks-p sebagai berikut :

$$\begin{matrix}
 & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\
 \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & 0 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 \end{bmatrix}
 \end{matrix} \quad (2-31)$$

Matriks probabilitas transisi stokastik ($\Delta t \rightarrow 0$) adalah :

$$P = \begin{bmatrix} 1 - (\lambda_1 + \mu_1) & \lambda_1 & \mu_1 & 0 \\ \lambda_2 & 1 - (\lambda_2 + \mu_2) & 0 & \mu_2 \\ \mu_2 & 0 & 1 - (\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \mu_1 & \lambda_2 & 1 - (\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

Persamaan differensial markov di dalam vektor notasi matriks, adalah :

$$P' = \begin{bmatrix} P_1' \\ P_2' \\ P_3' \\ P_4' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \mu_1) & \lambda_1 & \mu_1 & 0 \\ \lambda_2 & -(\lambda_2 + \mu_2) & 0 & \mu_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \mu_1 & \lambda_2 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

Solusi pendekatan untuk memperoleh *The steady-state probability* (probabilitas terbatas) adalah dengan memecahkan persamaan aljabar sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \mu_1) & \lambda_1 & \mu_1 & 0 \\ \lambda_2 & -(\lambda_2 + \mu_2) & 0 & \mu_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \mu_1 & \lambda_2 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

Solusinya adalah :

$$1 = \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-35)$$

$$2 = \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-36)$$

$$3 = \frac{\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-37)$$

$$4 = \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-38)$$

Jika komponen tersusun dengan konfigurasi seri, maka berdasarkan persamaan 2.9 dan 2.10 *availability* dan *unavailability* nya secara berturut-turut :

$$\frac{U}{A} = \frac{U}{A} = \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-39)$$

dan :

$$U = \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} + \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} + \frac{\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-40)$$

Jika komponen tersusun dengan konfigurasi paralel, cukup hanya 1 dari 2 komponen yang dibutuhkan di dalam kondisi yang baik bagi sistem. Untuk kasus ini :

$$A = F_1 + F_2 + F_3 = \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)} + \frac{\mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-41)$$

dan :

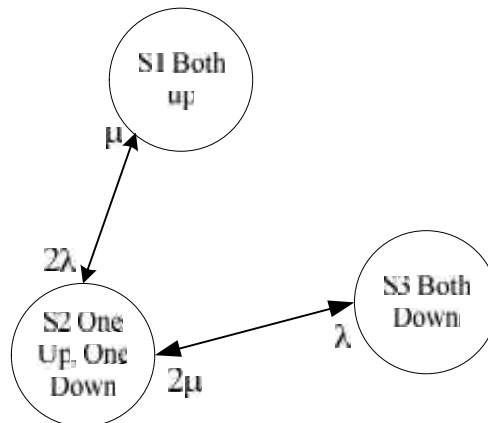
$$U = F_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-42)$$

2.3.4 Sistem dengan Dua Komponen Identik yang Dapat Diperbaiki

Laju kerusakan dan laju perbaikan untuk sistem dengan dua komponen yang identik secara berturut-turut adalah $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ dan $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Langkah pertama di dalam analisis ini adalah mengidentifikasi kemungkinan keadaan dari sistem (Ramakumar, 1993), yaitu :

- Keadaan 1 Kedua komponen **up** (baik)
- Keadaan 2 Salah satu komponen **down** (rusak)
- Keadaan 3 Kedua komponen **down**

Diagram keadaan untuk ketiga keadaan di atas dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5 Diagram Keadaan Dua Komponen Identik yang dapat Diperbaiki

Dari diagram keadaan gambar 2.5 di atas, dapat dibuat matriks- ρ sebagai berikut:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} S1 & S2 & S3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & \lambda & 0 \\ \mu & 0 & \lambda \\ 0 & 2\mu & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2-43)$$

Persamaan differensial markov dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_1(t) \\ \dot{P}_2(t) \\ \dot{P}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\lambda & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \mu) & 2\mu \\ 0 & \mu & 1 - 2\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

Matriks probabilitas transisi stokastik matriks ρ , ($\Delta t \rightarrow 0$) adalah :

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 - 2\lambda & 0 & 0 \\ \lambda & 1 - (\lambda + \mu) & 2\mu \\ 0 & \mu & 1 - 2\mu \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

Dari matriks di atas, maka :

$$(1 - 2\lambda)P_1 + \mu P_2 = P_1 \quad (2-46)$$

$$2\lambda P_1 + (1 - \lambda - \mu)P_2 + 2\mu P_3 = P_2 \quad (2-47)$$

$$\lambda P_2 + (1 - 2\mu)P_3 = P_3 \quad (2-48)$$

Karena $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ atau $P_1 + P_2 + P_3 = 1$, sehingga diperoleh :

$$P_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2-49)$$

$$P_2 = \frac{2\lambda}{\mu} \left[\frac{1}{\lambda + \mu} \right] \quad (2-50)$$

$$P_3 = \frac{2}{\lambda + \mu} \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} \right] \quad (2-51)$$

Jika kedua komponen dibutuhkan untuk mencapai keberhasilan sistem (konfigurasi seri), maka ketersediaan sistem dan ketidaktersediaan secara berturut-turut adalah :

$$A = P_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (2-52)$$

dan :

$$U = P_2 + P_3 = \frac{2}{\lambda + \mu} \left[\frac{\mu + \lambda}{\lambda + \mu} \right] \quad (2-53)$$

Jika kedua komponen yang dibutuhkan untuk mencapai keberhasilan sistem (konfigurasi paralel), maka ketersediaan dan ketidaktersediaan sistem secara berturut-turut adalah :

$$A = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda^2 + \mu^2}{(\lambda + \mu)^2} \quad (2-54)$$

dan :

$$U = P_3 = \left[\frac{-\lambda}{\lambda + \mu} \right] \quad (2-55)$$

Untuk mendapatkan **MTTF**, sesuai dengan persamaan 2.26 diasumsikan **S3** sebagai keadaan serap sehingga matriks **P** Persamaan 2.45 dapat disusun sebagai berikut :

$$\begin{array}{c|cc} & S_1 & S_2 & S_3 \\ \hline S_3 & 1 & 0 & 0 \\ S_1 & 0 & (1 - 2\lambda) & 2\lambda \\ S_2 & \lambda & \mu & (1 - \lambda - \mu) \end{array} \quad (2-56)$$

Berdasarkan matriks di atas didapat matriks Q sebagai berikut :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 - 2\lambda & 2\lambda \\ \mu & (1 - \lambda - \mu) \end{bmatrix} \quad (2-57)$$

Nilai berikut merupakan matriks fundamentalnya :

$$\begin{aligned} [1 - Q]^{-1} &= \begin{bmatrix} 1 - 2\lambda & 2\lambda \\ \mu & (1 - \lambda - \mu) \end{bmatrix}^{-1} \\ &= \left[\frac{1}{2\lambda^2} \right] \begin{bmatrix} (1 - \lambda - \mu) & 2\lambda \\ -\mu & 2\lambda \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-58)$$

Berdasarkan matriks fundamental di atas, jika prosesnya dimulai dari keadaan 1, maka MTTF nya adalah :

$$a \text{ adalah } \frac{1}{MTTF} = \frac{(1 - \lambda - \mu)}{2\lambda^2} + \frac{2\lambda}{2\lambda^2} = \frac{3 - \lambda - \mu}{2\lambda^2} \quad (2-59)$$

Sedangkan jika prosesnya dimulai dari keadaan 2, maka MTTF nya adalah :

$$ya \text{ dir } \frac{1}{MTTF} = \frac{\mu}{2\lambda^2} + \frac{2\lambda}{2\lambda^2} \quad (2-60)$$

2.3.5 Metode Pendekatan Markov untuk Sistem Konfigurasi Seri dan Paralel

a. Konfigurasi Seri

Dimisalkan terdapat dua buah komponen yang tersusun secara seri dengan laju kerusakan adalah λ_1 , λ_2 dan laju perbaikannya adalah μ_1 , μ_2 . Sehingga besarnya laju kerusakan dan perbaikan keseluruhan sistem dinyatakan dalam λ_s dan μ_s (Ramakumar, 1993).

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (2-61)$$

$$\mu_s = \mu_1 + \mu_2 \quad (2-62)$$

Keberhasilan sistem untuk konfigurasi seri ditentukan oleh komponen pertama. Berikut persamaan P_1 yang diambil dari persamaan 2.23 :

$$P_1 = \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-63)$$

Sehingga probabilitas sistem dalam kondisi baik (*The steady - state probability*) dinyatakan ke dalam persamaan sebagai berikut :

$$P_1 = \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-64)$$

Sehingga diperoleh :

$$P_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} \quad (2-65)$$

Jika waktu perbaikan rata-rata tiap unit adalah r_1 , r_2 , dan r_3 , dimana : $r_1 = \frac{1}{\mu_1}$,

$r_1 = \frac{1}{\mu_2}$, dan $r_1 = \frac{1}{\mu_3}$, maka :

$$P_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} \quad (2-66)$$

Besarnya $\lambda_1 r_1$ dan $\lambda_2 r_2$ akan sangat kecil, maka :

$$\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2 \cong \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 \quad (2-67)$$

Sehingga :

$$P_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\mu_1}{\lambda_s} \quad (2-68)$$

Sehingga laju kerusakan dan perbaikan sistem yang tersusun secara seri dapat dinyatakan dengan :

$$\lambda^s = \sum_{i=1}^n \lambda^i \quad (2-69)$$

$$\mu^s = \frac{1}{\lambda^s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda^i r^i} \quad (2-70)$$

b. Konfigurasi Paralel

Di dalam sistem yang unit-unitnya tersusun secara paralel, sistem akan rusak jika semua unit rusak (Ramakumar,1993). Dengan menggunakan persamaan (2-37) probabilitas sistem dalam keadaan rusak adalah :

$$Q^p = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-71)$$

Sehingga probabilitas sistem dalam keadaan rusak dinyatakan ke dalam persamaan berikut :

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_p + \mu_p} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (2-72)$$

Sehingga diperoleh:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\frac{\lambda_1 \mu_2}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\mu_1 \lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} + \mu_1 \mu_2} \quad (2-73)$$

Karena pada sistem yang tersusun secara paralel, sistem akan dikatakan dalam keadaan baik jika semua komponennya berada dalam keadaan baik, maka laju perbaikan total sama dengan jumlah dari laju perbaikan masing-masing unit, yaitu:

$$\mu_p = \mu_1 + \mu_2 \quad (2-74)$$

Dengan menggunakan persamaan ini maka didapatkan λ_p , yaitu :

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\frac{\lambda_1 \mu_2}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\mu_1 \lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} + \mu_1 \mu_2} \quad (2-75)$$

$$\lambda_p = \frac{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}} \quad (2-76)$$

Sama seperti konfigurasi seri $\lambda_1 r_1$ dan $\lambda_2 r_2$ akan sangat kecil, sehingga :

$$\lambda_p = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad (2-77)$$

2.3.6 Langkah-langkah Analisis Keandalan Sistem dengan Pendekatan Markov

Berikut langkah-langkah yang harus dilakukan untuk menentukan keandalan sistem dengan menggunakan pendekatan Markov.

1. Identifikasi semua kondisi (*state*) di mana sistem mungkin bertransisi.
2. Buat diagram keadaan untuk setiap perubahan transisi keadaan.
3. Buat matriks transisi dari satu keadaan ke keadaan yang lain.
4. Turunkan persamaan diferensial yang sesuai atau susunlah *stokastik transitional probability matrix*-nya.
5. Dengan metode persamaan diferensial atau perkalian matriks, tentukan probabilitas *state*-nya.
6. Tentukan *availability* dan *unavailability* dengan menggabungkan nilai probabilitas kondisi yang bersesuaian yang menjamin sistem beroperasi dan sistem gagal.
7. Dengan menggunakan prinsip *absorbing state*, selesaikan persamaan diferensial yang dimodifikasi untuk menentukan keandalan sistem dan selanjutnya gunakan persamaan tersebut untuk mendapatkan MTTF.

BAB IV

ANALISIS KEANDALAN SISTEM INSTRUMENTASI PLTG DI PT. PLN PLTD/G TELUK LEMBU PEKANBARU

Kecanggihan dari teknologi instrumentasi di industri PLTG diikuti dengan resiko hilangnya daya yang cukup besar pada saat terjadi kegagalan instrumentasi (*failure*). Hal ini tentunya tidak dikehendaki oleh PT. PLN karena terjadinya *failure* juga mengakibatkan hilangnya pelayanan dan pendapatan bagi perusahaan. Untuk meningkatkan keandalan sistem, dapat diterapkan sistem redundansi yang akan berperan secara aktif pada saat terjadinya *failure* dengan mengalihkan unit aktif ke unit cadangan yang telah ditetapkan. Mekanisme unit cadangan dapat mengatasi kegagalan yang diakibatkan oleh gangguan pada spesifikasi *instrument/range* dari instrumentasi itu sendiri.

Keandalan sistem PLTG pada pendistribusian daya listrik dipengaruhi oleh keandalan elemen perangkat penyusun yang terintegrasi satu dengan yang lain. Keandalan sistem PLTG yang akan dianalisis adalah keandalan sistem instrumentasi pada PLTG Teluk Lembu.

4.1 Data Perangkat

Untuk mendukung kelengkapan analisis ini dibutuhkan data laju kerusakan dan laju perbaikan untuk masing-masing komponen pendukung pendistribusian daya listrik. Data perangkat yang digunakan adalah data komponen PLTG PT. PLN Teluk Lembu yang diberikan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Laju Kerusakan dan Laju Perbaikan Komponen

Elemen Perangkat	Laju kerusakan (λ)		Laju perbaikan (μ)	
	FITs	Per-jam	MTTR (jam)	Per-jam
<i>Diesel Engine</i> (DE)	42	$4,2 \times 10^{-8}$	6	$9,722 \times 10^{-2}$
Ruang Bakar (RB)	539	$5,39 \times 10^{-7}$	12-24	$7,111 \times 10^{-1}$ – 1,422
Exhaust Hi Hi (Exh)	1023	$1,023 \times 10^{-6}$	12-24	1,15 – 2,23
Generator (G)	52	$5,2 \times 10^{-8}$	6	0,1
PMT	1631	$1,631 \times 10^{-6}$	24-48	1,070 -2,140

Dari tabel 4.1 di atas dapat dijelaskan bahwa : *Diesel Engine* (DE) memiliki laju kerusakan (λ) dengan FITs 42 dan $4,2 \times 10^{-8}$ per-jam. Sedangkan laju perbaikan (μ) nya MTTR 6 jam dan $9,722 \times 10^{-2}$ per-jam. Untuk Ruang Bakar (RB) memiliki laju kerusakan (λ) dengan 539 dan $5,39 \times 10^{-7}$ per-jam. Sedangkan laju perbaikan (μ) nya MTTR 12-24 jam dan $7,111 \times 10^{-1} - 1,422$ per-jam. Untuk Exhaust Hi Hi (Exh) memiliki laju kerusakan (λ) dengan 1023 dan $1,023 \times 10^{-6}$ per-jam. Sedangkan laju perbaikan (μ) nya MTTR 12-24 jam dan $1,15 - 2,23$ per-jam. Untuk Generator (G) memiliki laju kerusakan (λ) 52 dan $5,2 \times 10^{-8}$ per-jam. Sedangkan laju perbaikan (μ) nya MTTR 6 jam dan 0,1 per-jam. Untuk PMT memiliki laju kerusakan (λ) 1631 dan $1,631 \times 10^{-6}$ per-jam. Sedangkan laju perbaikan (μ) nya MTTR 24-48 jam dan $1,070 - 2,140$ per-jam. Tabel 4.1 dibuat berdasarkan asumsi bahwa data selain sistem instrumentasi diabaikan.

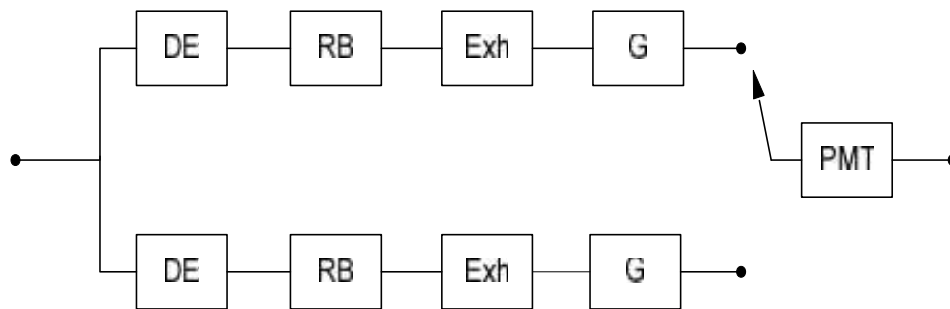
Untuk memudahkan langkah dalam menganalisis keandalan instrumentasi pembangkit ditetapkan juga beberapa asumsi yang digunakan dalam perhitungan, yaitu :

1. Kondisi yang mungkin terjadi pada instrumentasi pembangkit hanya ada dua keadaan, yaitu beroperasi dan atau rusak.
2. Semua unit beroperasi pada keadaan *steady state* atau mempunyai probabilitas keadaan yang terbatas.
3. Unit redundansi bersifat ideal, sangat kecil kemungkinan akan mengalami kegagalan pada keadaan tidak beroperasi atau unit redundan akan gagal jika unit utama telah gagal.

4.2 Analisis Keandalan Instrumentasi Pembangkit PLTG di PT.PLN PLTD/G Teluk Lembu

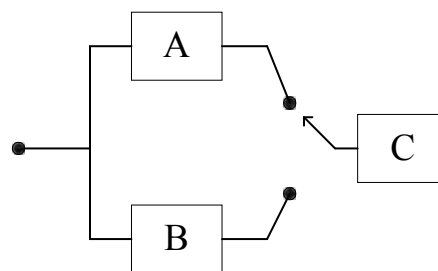
Untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan dengan menggunakan metode Markov, maka konfigurasi instrumentasi pembangkit yang akan ditampilkan pada bab IV ini adalah konfigurasi yang telah disederhanakan dengan menggunakan blok diagram.

Redundansi aktif (1+1)



Gambar 4.1 Diagram Blok Keandalan Dua PLTG dengan Redundansi Aktif (1+1)

Setelah melakukan pemodelan keandalan seperti pada gambar 4.1 di atas, selanjutnya kita juga perlu untuk melakukan penyederhanaan konfigurasi tersebut seperti pada gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4.2 Penyederhanaan Blok Keandalan Dua PLTG dengan Redundansi Aktif (1+1)

Dengan konsep dasar seperti telah dijelaskan dalam bab 3 mengenai pendekatan Markov untuk sistem yang terdiri dari komponen-komponen yang terhubung secara seri dan paralel, besarnya laju kerusakan dan laju perbaikan unit A, B dan C dapat diperoleh dengan cara sebagai berikut:

➤ Laju kerusakan dan perbaikan unit A (unit utama)

• Laju kerusakan

$$\begin{aligned}\lambda_A &= \lambda_{DE} + \lambda_{RB} + \lambda_{Exh} + \lambda_G \\ &= 4,2 \times 10^{-6} + 5,39 \times 10^{-7} + 1,023 \times 10^{-6} + 5,2 \times 10^{-8} \\ &= 1,565 \times 10^{-6} / \text{jam}\end{aligned}$$

- Laju Perbaikan

$$\mu_A = \frac{1}{r_A}$$

Dari persamaan 2- 69, maka:

$$r_A = \frac{1}{\lambda_1} \sum_{i=1}^r \lambda_i r_i$$

$$\begin{aligned} r_A &= \frac{1}{\lambda_A} [(r_{DE} \lambda_{DE}) + (r_{RB} \lambda_{RB}) + (r_{Exh} \lambda_{Exh}) + (r_G \lambda_G)] \\ &= \frac{1}{1,656 \times 10^{-6}} [(6 \times 4,2 \cdot 10^{-8}) + (24 \times 5,39 \cdot 10^{-7}) + (24 \times 1,023 \cdot 10^{-6}) \\ &\quad + (6 \times 5,2 \cdot 10^{-8})] \\ &= 22,97705314 \text{ jam} \end{aligned}$$

Maka : $\mu_A = 0,041661678 / \text{jam}$

- Laju kerusakan dan perbaikan unit B (unit proteksi)

Unit utama identik dengan unit proteksi sehingga laju kerusakan dan laju perbaikan unit B sama dengan unit A ($\lambda_A = \lambda_B$ dan $\mu_A = \mu_B$).

- Laju kerusakan dan perbaikan unit C (unit redundansi)

- Laju kerusakan

$$\lambda_C = \lambda_{PMT} = 1,631 \times 10^{-6}$$

- Laju Perbaikan

$$r_C = 48$$

$$\mu_C = 0,02083333333 / \text{jam}$$

Laju kerusakan dan laju perbaikan unit A, B dan C dari hasil perhitungan diatas dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Laju Kerusakan dan Laju Perbaikan Unit-Unit pada PLTG

Unit	Laju Kerusakan (per-jam)	Laju Perbaikan (per-jam)
A	$1,656 \times 10^{-6}$	0,04351789405
B	$1,656 \times 10^{-6}$	0,04351789405
C	$1,631 \times 10^{-6}$	0,02083333333

Untuk menghitung ketersediaan instrumentasi pembangkit PLTG, maka digunakan persamaan 3-7 :

$$A = P1 + P2$$

$$A = \frac{(2\mu + \mu_c)(2\lambda + \lambda_c + \mu) + \mu_c(\mu + 3\lambda + \lambda_c)}{(3\mu + \lambda + \lambda_c)(2\lambda + \lambda_c + \mu_c)(2\mu + \mu_c - 2\lambda)(\mu - \mu_c)}$$

$$A = 0,9999873259 = 99,99873259 \%$$

$$\begin{aligned} \text{Ketidaktersediaan} = U &= 100\% - A \\ &= 0,00126741 \% \\ &= 1,26741 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Down Time System} &= 24 \text{ Jam} \times 365 \text{ Hari} \times U \\ &= 0,111025116 \text{ jam/tahun} \\ &= 6,66150696 \text{ menit/tahun} \end{aligned}$$

Untuk menghitung MTTF sistem menggunakan persamaan 3-12 :

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= \frac{3\lambda + \lambda_c + \mu}{(2\lambda + \lambda_c)(\mu + \lambda + \lambda_c) - 2\lambda\mu} \\ &= 613073,4179 \text{ jam} \\ &= 69,98554999 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan parameter keandalan diperoleh ketersediaan sebesar 99,99873259 %, *down time system* sebesar 6,66150696 menit/tahun, dan MTTF atau usia pakai sistem instrumentasi disetiap komponen adalah 69,98554999 tahun. Adapun target PT. PLN Teluk Lembu untuk ketersediaan suatu pembangkit minimal 99,8904 % yang berarti *down time system* maksimal 16,0016 menit/tahun. Dapat disimpulkan bahwa keandalan sistem instrumentasi PLTG dengan metode markov lebih baik dari kriteria yang ditentukan PT. PLN Teluk Lembu.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis pada bab-bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Keandalan untuk komponen pembangkit pada sistem instrumentasi PLTG telah memenuhi persyaratan untuk proses industri.
2. Dengan menggunakan metode Markov, didapatkan nilai ketersediaan sebesar 99,99873259 %, *down time system* sebesar 6,66150696 menit/tahun, dan MTTF atau usia pakai sistem instrumentasi disetiap komponen adalah 69,98554999 tahun. Bahkan jauh lebih baik dari kriteria yang ditentukan industri.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, pengembangan bisa dilakukan. Tidak hanya menggunakan metode Markov yang dapat menentukan keandalan instrumentasi, metode lain yang dapat menganalisis keandalan instrumentasi seperti *Fault Tree Analysis* (FTA) yang menganalisis keandalan dengan bentuk diagram pohon atau metode *Failure Modes And Effect Analysis* (FMEA).

DAFTAR PUSTAKA

- Andi Mulyadi, Keandalan Interkoneksi Antar Pembangkit Sumbar. Laporan penelitian. 2003
- Anonymos, “History PLTG”,
http://www.ccitonline.com/mekanikal/tikipagehistory.php?page=PLTG&diff2=1&diff_style=sideview, diakses tanggal 4 Maret 2011
- Digital Library ITS,
<http://digilib.its.ac.id/ITS-Undergraduate-3100010037967/12120>, diakses tanggal 4 Maret 2011
- Ebeling, Charles E. “*Reliability and Maintainability Engineering*”, McGraw-Hill international editions : *Electrical engineering series*, Universitas Michigan. 1997
- Endrianto, Ennol. Peningkatan Efisiensi *Combine cycle* untuk performansi HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*). Laporan Penelitian ITS. 2009
- GE Power System. “*Gas turbine operating manual*” , PLN ujung pandang sulawesi, Indonesia. 1997
- Gunawan, Arief Hamdani dan Franky Ferdinand. “*Kajian Keandalan SDH pada JARLOKAF*”, Elektronika Indonesia, no.44, Thn IX. 2002
- Henley, E.J. dan Hiromitsu Kumamoto. “*Probabilistic Risk Assesment*”, “*reliability engineering, Design and Analysis*”, Halaman 20-50, New York, IEEE Press. 1992
- Ramakumar, R. “*Engineering Reliability*”, “*Fundamentals and Aplications*”, Halaman 50-112, New Jersey, Englewood Cliffs. 1993
- W. Culp JR, Archie. “*Prinsip-prinsip konversi energi*” (terjemahan Ir Darwin sitompul, Meng), Jakarta : Erlangga. 1991
- Waradiba, Safarina. Analisis Reliability Instrument Menggunakan *Metode Failure Modes And Effect Analysis (FMEA)* pada *Boiler Feed Pump Turbin (BFPT)* Untuk Memperbaiki Kinerja Terencana di PT. IPMOMI. Laporan Skripsi, ITS, Surabaya. 2007
- Zuhal. “*Dasar Tenaga Listrik*”, Bandung : ITB. 1982